

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 24 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350526

研究課題名(和文) 乳幼児CT検査における年齢別被ばく評価と検査の最適化に関する研究

研究課題名(英文) Study on age-specific dose evaluation and optimization of infant CT examinations

研究代表者

川浦 稚代 (YAMAUCHI-KAWAURA, CHIYO)

名古屋大学・医学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：60324422

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、X線CT検査による乳幼児被ばくの実態を実測により調査するために、日本人型の3歳児人体ファントムを開発し、ファントム内部の主要組織・臓器に蛍光ガラス線量計を多数埋め込んだ3歳児ファントム臓器線量計測システムを構築した。開発した臓器線量計測システムの妥当性を検証するために、同年代の数学ファントムを使ったCT線量シミュレーションWebシステム(WAZA-ARI)による計算値との比較を行ったところ、両システムの線量値は20%の許容誤差内で一致した。各年齢の頭部、胸部、腹部・骨盤部CT検査における実効線量を比較したところ、0-6歳までは年齢に依存せず同等であることが分かった。

研究成果の概要(英文)：In this study, to estimate Japanese patient doses in infant CT examinations from dose measurements using anthropomorphic phantoms, we developed a Japanese 3-year-old phantom and constructed an in-phantom dosimetry system consisting of radiophotoluminescence glass dosimeters installed at various tissue/organ sites within the phantom. To investigate whether the phantom materials and structure with the 3-year-old phantom were appropriate for dose assessment in CT examinations, we compared organ and effective doses between the 3-year-old in-phantom dosimetry system and a web-based CT dose calculation system, WAZA-ARI. The doses for organs within scan regions and effective doses between both systems coincided with each other within allowable error of 20%. It was found from age-specific dose measurements that the effective doses for 0- to 6-year-old patients in head, chest and abdominopelvic CT examinations were equivalent regardless of age.

研究分野：放射線計測学

キーワード：放射線計測学 CT 人体ファントム 乳幼児 医療被ばく

1. 研究開始当初の背景

(1) 平成 24 年 6 月、LANCET 誌において、小児期に複数回の CT 検査を受診すると(累積吸収線量が 50-60mGy に到達すると)、受診後 10 年のうちに脳腫瘍または白血病の発症リスクが 3 倍に増大するといった内容が公表された。我々の実測による調査によると、小児(6 歳児)の頭部 CT 検査における脳線量は約 30mGy であり、診断および治療の経過観察目的で短期間に複数回頭部 CT 検査を受診すると、将来的な脳腫瘍発症リスクは劇的に増加することが予測される。

(2) しかし、経過観察目的の短期間の繰り返し検査は、さらに年齢の低い乳幼児に対して行われているのが現状である。乳幼児は、体が小さく、組織・臓器が未発達なため、大人に比べ画像のコントラストがつきにくく、被ばく低減により診断能が低下する危険性が高い。ゆえに、通常は CT 装置に搭載されている画質が担保された被ばく低減システムを使用する機会が多いが、年齢によっては、大人に比べ被ばく低減効果が小さい場合もある。

(3) 乳幼児期は、一生の中で最も体型変動が激しい時期であるため、年齢(体型)に応じた被ばく低減対策が必要であるが、日本での乳幼児 CT 被ばくの線量レベルは不明であり、検査の最適化やリスク評価に必要な臓器線量や実効線量の年齢別の線量データは見当たらない。

2. 研究の目的

(1) 日本の乳幼児 CT 被ばくの線量レベルを実測により調査し、年齢に即した検査の最適化を検討する。具体的には、以下の項目について実施する。

日本人乳幼児の体型を模した人体等価ファントムを作製し、ファントム内部の主要組織・臓器に、微小な線量計を多数設置した乳幼児ファントム臓器線量計測システムを開発する。本研究では、対象年齢を 0 歳(0-0.5 歳未満)、0.5 歳(0.5-1 歳未満)、1 歳(1 歳 - 2 歳未満)、3 歳(3 歳 - 4 歳未満)としてファントムの設計を行い、実際の作製に関しては、過去の科研費研究において、予算の関係から頭頸部までしか作製できなかった 3 歳児ファントム体幹部の作製を中心に行う。

開発した臓器線量計測システムの妥当性の検証を行う。ファントムの材質、形状等が、年齢に応じた人体の被ばく線量評価に使用可能かどうかを調べる。

各病院において、日常的に使用されている撮影条件を用い、開発した臓器線量計測システムを撮影し、臓器・実効線量を評価する。過去の科研費研究で共同開発した 0 歳児およ

び 6 歳児人体ファントム臓器線量計測システムによる被ばく線量評価値との比較から、3 歳児の CT 被ばくの現状把握と検査の最適化の可能性を検討する。

3. 研究の方法

(1) ファントム設計

平成 22 ~ 24 年度の科研費研究(代表者：川浦)において、日本人型の 0 歳から 3 歳児ファントムの構造を決定し、3 歳児の頭頸部ファントムの作製を完了した。ファントム構造の基本となる人体構造データは、過去に診断目的で CT 検査を受診した患者の CT 画像から計測した。しかし、一般に、CT 検査の半数以上が頭頸部の検査であるため、体幹部の人体構造データはファントム構造を決定する上で不十分な箇所があった。そこで本研究では、まず、より正確に人体構造を模擬できるように、追加で体幹部の人体構造データの収集を行った。計測した人体構造データが、日本人の健常人の平均的な人体形状を反映しているかどうかは、同年代の健康な乳幼児における体型データの文献値と比較することで確認した。得られた人体構造データを基に、未完成であった 3 歳児ファントムの設計図および部品加工図を作製した。

(2) 3 歳児ファントム体幹部の作製

ファントム素材には、頭頸部ファントムと同様、International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) Report 44 に放射線線量計測用組織等価物質として報告されているアクリル樹脂(筋肉)、石膏(骨)を使用し、今回、肺等価材としてはタフラング 260 を採用した。部品加工図を基に、アクリルとタフラング 260 の全パーツをマシニング加工で加工し、骨部分は石膏を流し込んで固めた。International Commission on Radiological Protection (ICRP) Publication 103 において、実効線量評価に必要なとされているリスク臓器位置に線量計を設置するための穴を開けた。上記の構成で日本人型 3 歳児体幹部ファントムを作製した。

(3) 臓器線量計測システムの構築

ファントム内部に設置する線量計として、本研究では市販のガラス線量計(GD-352M, 旭テクノグラス(株))を採用した。ガラス線量計は、国家標準電離箱線量計とトレーサビリティの取れた電離箱線量計を用いて、使用するエネルギーごとに校正を行った。作製した 3 歳児体幹部ファントムに、過去の科研費研究(代表者：川浦)で作製した 3 歳児頭頸部ファントムを結合させ、全身の合計 152 箇所にガラス線量計を配置した 3 歳児ファントム臓器線量計測システムを完成させた。

(4) 3 歳児ファントム臓器線量計測システムの妥当性の検証

臓器線量計測システムの妥当性の検証に

は、本来、同年齢の市販の人体ファントムによる線量評価値との比較が必要であるが、同年齢の物理ファントムや数学ファントムが存在しないため、本研究では、放射線医学総合研究所が無償で Web 公開している「CT 撮影による被ばく線量を評価する Web システム-WAZA-ARI v1-」による線量シミュレーションで計算された線量値と比較することで、開発した臓器線量計測システムの妥当性を検証することとした。WAZA-ARI v1 では、小児用の線量評価として、4 歳女児の数学ファントムを用いている。

表 1. 撮影条件

| | 頭部 CT | 胸部 CT | 腹部-骨盤 CT |
|----------------|-------|-------|----------|
| 管電圧 (kV) | 120 | 120 | 120 |
| 実効 mAs | 151 | 25 | 35 |
| 回転時間(s/scan) | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| ビーム幅 (mm) | 20 | 40 | 40 |
| ピッチファクタ | 0.531 | 1.375 | 0.984 |
| スキャン長 (mm) | 135 | 160 | 250 |
| D-FOV | 220 | 210 | 210 |
| CTDI (mGy) | 24.9 | 3.6 | 5.2 |
| DLP (mGy · cm) | 389.8 | 81.7 | 155.3 |

表 1 は、両システムの線量評価に使用した撮影条件を示している。CT 装置には、GE 社製の LightSpeed VCT を用いた。表 1 は、ある病院において臨床で実際に使用されている頭部、胸部、腹部-骨盤部の検査条件を参考に決定しているが、通常、胸部および腹部-骨盤部の検査においては、被ばくの低減を目的として、x-y-z 方向に管電流が変調する管電流変調機構が使用される。WAZA-ARI のシミュレーションにおいては、技術上 z 方向しか管電流の変調がかけられなかったため、両システムの撮影条件を揃えるために、臨床条件とは多少異なるが、胸部および腹部-骨盤部の撮影条件においても、管電流一定のヘリカルスキャンモードを設定することとした。

4. 研究成果

(1) CT 人体計測法の妥当性の検証

図 2 は、本研究において患者の CT 画像から計測した 0 歳～4 歳までの頭囲、胸囲、腹囲と、諸外国の発育調査等の文献値とを比較した結果である。いずれも、男女の平均値で表示した。

頭囲については、世界保健機関(WHO)の調査結果と厚生労働省の平成 22 年度乳幼児身体発育調査結果との比較を示しているが、胸囲と腹囲については、WHO の調査結果が無かったため、各国の健常人における発育調査結果と比較を行った。その結果、頭囲については、本研究の測定値が、どの年齢においても、健常人の頭囲と同等であることが分かった。一方、胸囲と腹囲に関しては、年齢によっては、若干、本研究での測定結果が小さい値を示しているように見えた。しかし、乳幼児は、CT 検査時にじっとしていられない

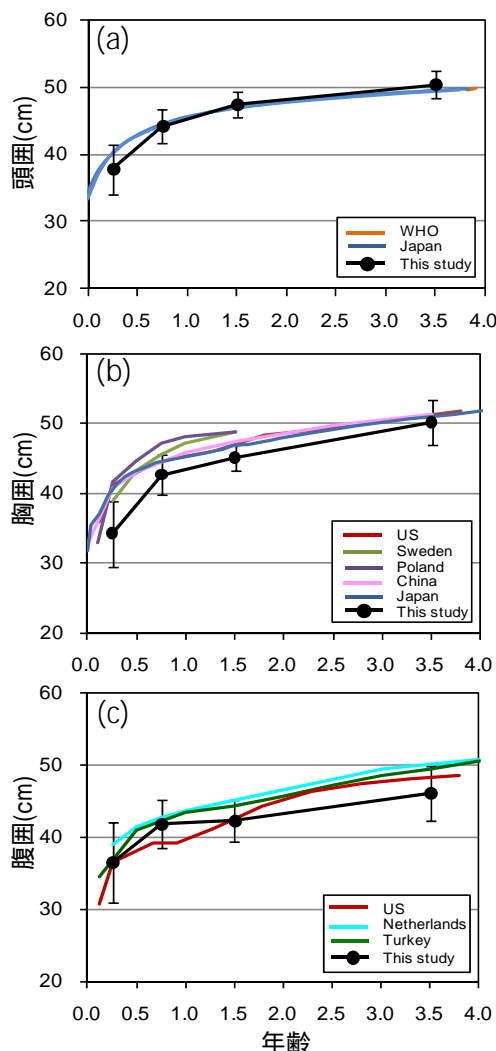


図2. 頭囲、胸囲、腹囲の比較

場合や、恐怖から泣き叫ぶことで呼吸が激しくなる場合が多く、健常人の健康診断等で測定された安静時の数値と比べると、多少変動は大きいと考えられる。また、患児の栄養状態や発育状態は健常人と比べて低い可能性がある。ゆえに、本研究で測定した乳幼児の体型は、一般に CT 検査を受診する**患児の体型**を概ね反映していると判断した。一方、本研究での人体計測から、日本人と外国人との人体形状の違いもいくつか確認できた。一般に、日本人の頭部は白人と比べると短頭型であると言われている。Koizumi ら は、正常な日本人乳幼児の CT 画像から各年齢の頭指数(頭幅/頭長 × 100)を測定し、同年齢の白人の文献値と比較している。その結果、日本人乳幼児の頭指数は白人よりも大きいことを示した。本研究での測定結果は Koizumi ら の結果とよく一致しており、本研究で得られた頭囲は、諸外国を対象とした調査による WHO の標準値と一致していたことから、諸外国の乳幼児と日本人乳幼児の頭の大きさは同等であるものの、形状は異なることが確認できた。Whittaker ら は、6 歳～11 歳までの小児における胸郭の大きさの比較から、アジア人は白人よりも胸郭が小さいことを明らかに

している。同様に、本研究のCT計測からも、日本人乳幼児は欧米人に比べ、胸郭の厚みと高さが小さいことが明らかになった。骨格や臓器の形状が異なれば、X線の体内での吸収・分布も異なるため、日本人のCT被ばくをより正確に評価する上で、本研究での日本人型人体ファントムの開発意義は大きい。

(2) 3歳児人体ファントム臓器線量計測システムの作製

平成22~24年度の科研費研究(代表者:川浦)において作製した3歳児頭頸部ファントムと本研究で作製した3歳児体幹部ファントムを結合し、日本人型3歳児人体ファントムを完成させた(図3)。ICRP Publication 103で報告されている、実効線量評価に必要なリスク臓器に基づいて、ファントム内部の主要な組織・臓器位置に、市販のガラス線量計を152個設置した(図3(b)、(c))。X線照射後、ガラス線量計をファントムから取り出し、70度で30分間加熱し、室温まで温度を低下させた後、FGD-1000を使用して蛍光量を読み取った。その蛍光値を臓器線量および実効線量に変換するシステムを構築した。

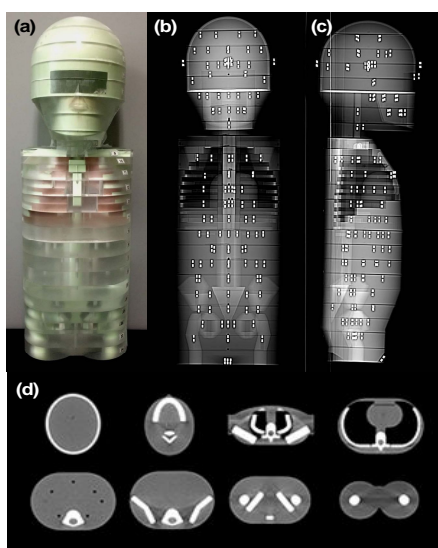


図3. 日本人型3歳児人体ファントム
(a) ファントム外観図、(b)透過図(正面)、(c)透過図(側面)、(d)横断面図。
(b)および(c)のファントム内外の棒状構造は、ガラス線量計を示す。

(3) WAZA-ARI との線量比較

本研究では、WAZA-ARI v1 で被ばく線量評価に使用されている、4歳女児のボクセルファントムに基づいたシミュレーション結果と3歳児ファントム臓器線量計測システムにおける実測値とを比較することで、3歳児ファントムの材質、構造等が臓器線量評価において妥当なものかどうかを検討した。設定したスキャン範囲を図4に示す。

図4の(a)、(b)、(c)における水色のラインで示された部分は、設定スキャン範囲であり、紫のラインで示された範囲は、オーバーレンジを含んだ実際のスキャン範囲である。ヘリカルスキャンの場合、設定スキャン範囲の両端の画像は、画像再構成において、設定ス

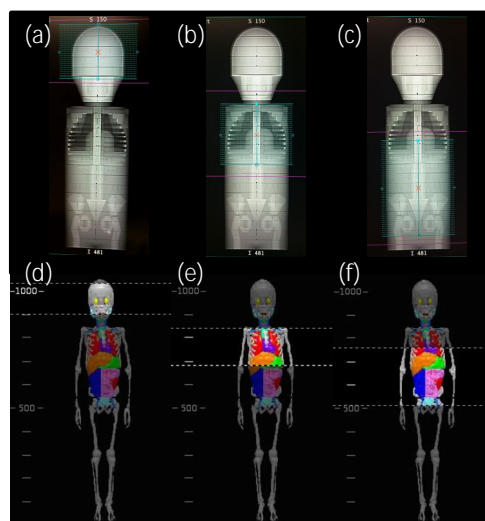


図4. 3歳児ファントム臓器線量計測システムとWAZA-ARI v1において設定したスキャン範囲

(a), (b), (c)は、3歳児ファントムにおける頭部、胸部、腹部-骨盤部CT検査におけるスキャン範囲。(d), (e), (f)は、WAZA-ARI(4歳女児)における頭部、胸部、腹部-骨盤部CT検査におけるスキャン範囲。

キャン範囲よりも管球回転半周分の画像情報を必要とする。これをオーバーレンジといい、ビーム幅やピッチファクタが大きいと、オーバーレンジは大きくなり、設定スキャン範囲(水色)と実際のスキャン範囲(紫色)との差は大きくなる。一方、WAZA-ARIでのシミュレーションにおいては、オーバーレンジは考慮されていないため、実際のスキャン範囲は点線から点線までの明るく表示された部分である(図3(d)、(e)、(f))。図5~図7はそれぞれ、頭部、胸部、腹部-骨盤部CT検査における3歳児ファントム臓器線量計測システムとWAZA-ARIによる臓器線量の実測値と計算値を比較した結果を示している。グラフ内の水色の部分は、およそその設定スキャン範囲を示している。頭部CT検査の場合、スキャン範囲内の臓器線量の実測値とWAZA-ARIにおける計算値との差は、14%以内であった。胸部と腹部-骨盤部CT検査でのスキャン範囲内の臓器の線量は、実測と計算との差がそれぞれ15%および20%以内であった。しかし、胸部CT検査の胃線量の実測値は、計算値の約2倍と高いことが分かる。この差は、実測においては、胃線量の測定に使用されているガラス線量計が、全てスキャン範囲内に含まれていたのに対し、WAZA-ARIのスキャン範囲には胃が全て含まれておらず、一部がスキャン範囲外にあったことが要因と考えられた(図4(e)参照)。一方、腹部-骨盤部CT検査においては、WAZA-ARIでの精巣線量が実測値よりも約6倍高い値を示した。これは、実測では、精巣の線量測定に使用された線量計がスキャン範囲に含まれなかったためであると考えられた。また、胸部CT検査における結腸の線量や、腹部-骨盤部CT検査における心臓や食道の線量が計算値に比べ実測値で高いのは、オーバーレンジの効果によるものと考えられた。体幹部の検査における

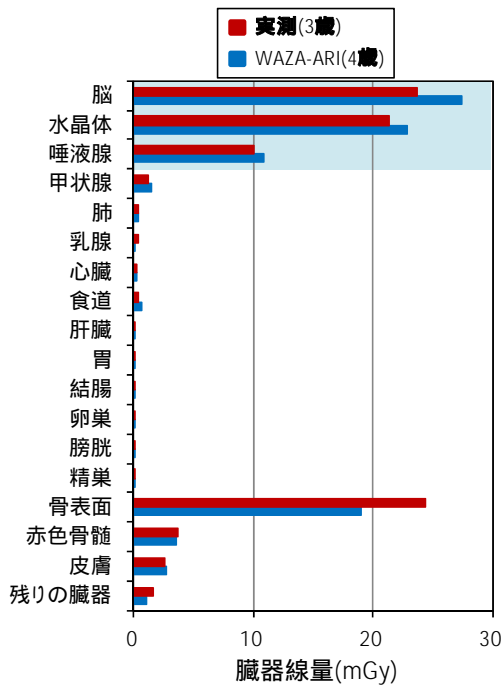


図5. 頭部CT検査における臓器線量の比較

皮膚や骨に関する線量の差には、腕の有無が影響を与えている可能性があった。体幹部の検査においては、WAZA-ARIの数学ファントムは、腕を下におろした姿勢をとっているため、腕がスキャン範囲に含まれているが、3歳児ファントムは予算の関係で腕が作製できなかったため腕は無く、腕の吸収線量はゼロとして取り扱っている。上記以外にも、実測値と計算値の間には様々な誤差要因が含まれている。ファントムの組成や形状の違い、シミュレーションでのジオメトリの不確かさも誤差の要因に含まれるであろう。

次に、実効線量を各撮影条件で比較したところ、両システムの実効線量の差は14%以内

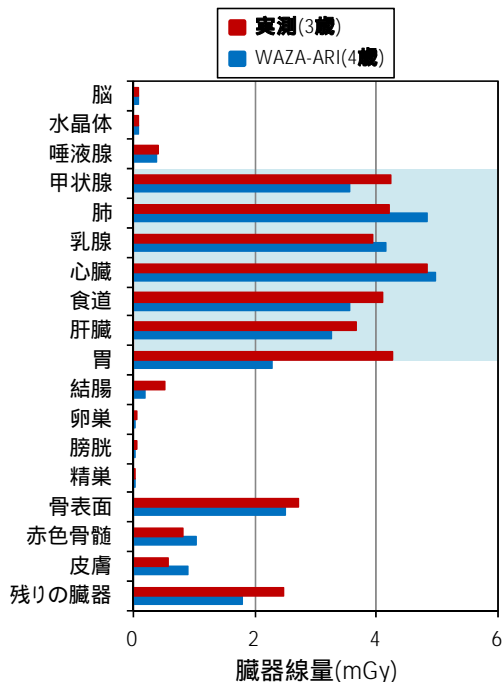


図6. 胸部CT検査における臓器線量の比較

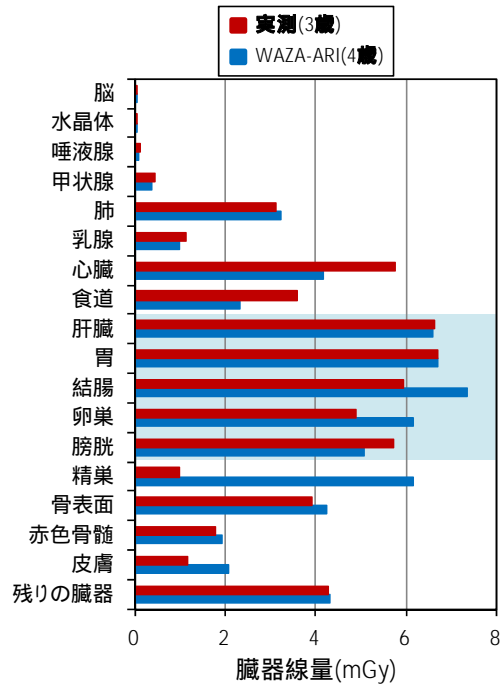


図7. 腹部 - 骨盤部CT検査における臓器線量の比較

であった。一般に、実測とシミュレーションとの違いが20%程度であれば、シミュレーションが実際の状況を良く近似できていると判断できる。本研究での臓器線量および実効線量の実測とシミュレーションの差は最大20%であったことから、我々の開発したファントムシステムを用いれば、3歳児の被ばく評価は十分可能であると考えられた。

(4)年齢別被ばく線量比較

3歳児ファントム臓器線量計測システムを病院に持ち込み、頭部、胸部、腹部 - 骨盤部CT検査におけるルーチン条件で撮影を行い、臓器線量および実効線量を測定・評価した。現在のところ、3歳児に関しては各部位それぞれ3条件ずつしかデータ収集していないが、過去の科研費研究で開発した0歳児および6歳児ファントム臓器線量計測システムでの評価値と比較したところ、体幹部のスキャン範囲内の臓器の線量は、0歳児と6歳児のほぼ中間の値を示した。一方、スキャン範囲外の臓器の線量は、0歳児が最も高かった。体幹部の検査では、通常管電流変調機構を使用するため、体の大きさに応じてX線の出力が制御され、スキャン範囲内の臓器線量は体が小さければ小さくなるが、スキャン範囲外では、オーバーレンジの効果によって、体の小さな低年齢児程、余分な被ばくを受ける範囲が広がる。その結果、実効線量はどの年齢も同程度になることが分かった。今後も引き続き、3歳児のCT被ばくの実態調査を継続し、年齢に応じた検査の最適化を検討する予定である。

(5) まとめ

本研究では、0歳~3歳児の日本人型人体ファントムを設計し、代表として3歳児ファ

ントムを完成させた。3歳児ファントムにガラス線量計を多数設置した人体ファントム臓器線量計測システムを構築した。このシステムを用いて、日本で初めて日本人3歳児の現状でのCT検査における臓器・実効線量評価を行った。他の年齢の被ばく線量レベルと比較することで、3歳児の主要なCT検査の患者被ばくの現状を臓器別に把握した。本研究で得られた線量データは、日本の乳幼児CT検査の最適化やリスク評価に大いに役立つであろう。

<引用文献>

Pearce, M.S. et al. Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: a retrospective cohort study., *Lancet*, 380, 499-505, 2012

WAZA-ARI. A web-based CT dose calculator. Available on http://waza-ari.nirs.go.jp/waza_ari_v1/.

Koizumi, T. et al. Cephalic index of Japanese children with normal brain development., *J. Craniofac. Surg.*, 21(5), 1434-1437, 2010

Whittaker, A.L. et al. Are ethnic differences in lung function explained by chest size? *Arch. Dis. Child. Fetal Neonatal Ed.*, 90(5), F423-F428, 2005

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 6件)

Chiyo Yamauchi-Kawaura, Keisuke Fujii, Keiichi Akahane, Masato Yamauchi, Satoshi Obara, Kazuhiro Narai, Toshihiko Katsu, Kuniharu Imai, Mitsuru Ikeda, Development of age-specific Japanese physical phantoms for dose evaluation in infant CT examinations., *Radiation Protection Dosimetry*, (peer-reviewed), 2016, in press, DOI: 10.1093/rpd/ncv420

Chiyo Yamauchi-Kawaura, Keisuke Fujii, Keiichi Akahane, Masato Yamauchi, Kazuhiro Narai, Takahiko Aoyama, Toshihiko Katsu, Satoshi Obara, Kuniharu Imai, Mitsuru Ikeda, Development of age-specific Japanese head phantoms for dose evaluation in pediatric head CT examinations., *Radiation Protection Dosimetry*, (peer-reviewed), 163(2), 188-201, 2015, DOI: 10.1093/rpd/ncu155

Chiyo Yamauchi-Kawaura, Masato Yamauchi, Kuniharu Imai, Mitsuru Ikeda, Takahiko Aoyama, Image quality and age-specific dose estimation in head and chest CT examinations with organ-based tube-current modulation., *Radiation Protection Dosimetry*, (peer-reviewed), 157(2) 193-205, 2013, DOI: 10.1093/rpd/nct137

[学会発表](計 31件)

川浦稚代、山内雅人、小原 哲、藤井啓輔、

赤羽恵一、今井國治、池田 充、臓器線量評価に基づいた乳幼児CT検査における非対称可変コリメータの被ばく低減効果に関する検討、第43回日本放射線技術学会秋季学術大会、2015年10月8-10日、金沢文化ホール(石川県)

川浦稚代、藤井啓輔、山内雅人、小原 哲、赤羽恵一、池田 充、今井國治、日本人型3歳児ファントム臓器線量計測システムを用いたCT検査における被ばく線量評価、第42回日本放射線技術学会秋季学術大会、2014年10月9-11日、札幌コンベンションセンター(北海道)

川浦稚代、藤井啓輔、山内雅人、赤羽恵一、奈良井和宏、池田 充、今井國治、小児CT検査における被ばく評価を目的とした日本人型3歳児人体ファントムの開発、日本保健物理学会第47回研究発表会、2014年6月19-20日、上齋原文化センター ヴァルトホール(岡山県)

[図書](計 1件)

山口 功 他、計15名(藤井啓輔:14番目)、オーム社、低線量肺がんCT検診の知識と実務 改訂2版、2013、91-107

6. 研究組織

(1)研究代表者

川浦 稚代 (YAMAUCHI-KAWAURA Chiyo)

名古屋大学・大学院医学系研究科・講師
研究者番号：60324422

(2)研究分担者

池田 充 (IKEDA Mitsuru)

名古屋大学・大学院医学系研究科・教授
研究者番号：50184437

(3)研究分担者

今井 國治 (IMAI Kuniharu)

名古屋大学・大学院医学系研究科・教授
研究者番号：20335053

(4)研究分担者

藤井 啓輔 (FUJII Keisuke)

名古屋大学・大学院医学系研究科・助教
研究者番号：40469937

(5)連携研究者

赤羽 恵一 (AKAHANE Keiichi)

量子科学技術研究開発機構・放射線医学総合研究所・チームリーダー
研究者番号：80202521